

Dampak *Total Suspended Solids* (TSS) Terhadap Tutupan Karang Hidup di Perairan Indonesia: Meta-Analisis

Safarah Agnia Saniy*, Putri Adelia, Ade Suryanda

Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta
Jl. R. Mangun Muka Raya, Rawamangun, Pulo Gadung, Jakarta Timur, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 13220 Indonesia
Corresponding author, e-mail: safarahagniasaniy@gmail.com

ABSTRAK: *Total Suspended Solids* (TSS) merupakan salah satu parameter lingkungan yang dapat mendegradasi ekosistem terumbu karang melalui penurunan intensitas cahaya dan gangguan fisiologis pada karang. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan meta-analisis guna memperoleh nilai efek gabungan (*pooled effect size*) dari pengaruh TSS terhadap tutupan karang hidup di perairan Indonesia. Metode yang digunakan adalah meta-analisis *Two-Group Comparison* berdasarkan studi primer yang dipublikasikan pada rentang tahun 2017-2026, dengan kriteria inklusi berupa studi yang dilakukan di perairan Indonesia, melaporkan parameter kuantitatif TSS bersamaan dengan persentase tutupan karang hidup, serta menyediakan nilai data mentah yang dapat dikonversi menjadi mean, jumlah sampel (*n*), dan standar deviasi (*SD*). Data dianalisis menggunakan perangkat lunak JASP dengan pendekatan *Random-Effects Model*. Hasil meta-analisis terhadap 10 studi primer menunjukkan tingkat heterogenitas yang rendah ($I^2 = 0,00\%$; $p = 0,797$) serta tidak ditemukan indikasi bias publikasi yang signifikan berdasarkan funnel plot yang simetris. Nilai efek gabungan yang diperoleh sebesar $-0,44$ ($p = 0,032$), yang menunjukkan bahwa TSS terbukti memberikan dampak kecil hingga sedang terhadap penurunan tutupan karang hidup di perairan Indonesia. Dengan demikian, pemantauan TSS secara berkala dan pengendalian sumber sedimen perlu dilakukan sebagai bagian dari pengelolaan kualitas perairan di sekitar ekosistem terumbu karang.

Kata kunci: Meta-analisis; TSS; tutupan karang

The Impact of Total Suspended Solids (TSS) on Live Coral Cover in Indonesian Waters: A Meta-Analysis

ABSTRACT: *Total Suspended Solids* (TSS) is one of the environmental parameters that can degrade coral reef ecosystems through reduced light intensity and physiological disturbances to corals. This study aims to conduct a meta-analysis to obtain the *pooled effect size* of the impact of TSS on live coral cover in Indonesian waters. The method used is a *Two-Group Comparison* meta-analysis based on primary studies published between 2017 and 2026, with inclusion criteria comprising studies conducted in Indonesian waters, reporting quantitative TSS parameters alongside live coral cover percentages, and providing raw data convertible into mean, sample size (*n*), and standard deviation (*SD*) values. Data were analyzed using JASP software with a *Random-Effects Model* approach. The meta-analysis of 10 primary studies showed a low level of heterogeneity ($I^2 = 0.00\%$; $p = 0.797$) and no significant indication of publication bias based on a symmetrical funnel plot. The *pooled effect size* obtained was -0.44 ($p = 0.032$), indicating that TSS has been proven to have a small to moderate impact on the decline of live coral cover in Indonesian waters. Therefore, regular monitoring and verification are needed to ensure that TSS concentrations in waters remain below the water quality standard threshold, as a mitigation step in the sustainable management and conservation of coral reef ecosystems.

Keywords: Coral cover; meta-analysis; TSS

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu episentrum ekosistem laut tropis terpenting di dunia yang menyumbang sekitar 15% dari total luas terumbu karang global di kawasan Segitiga Terumbu

Karang (Razak *et al.*, 2024). Sebagai aset ekologis dan ekonomis yang masif bagi wilayah pesisir, kondisi ekosistem ini sebenarnya telah dipantau secara intensif selama lebih dari lima dekade. Namun, volume data yang besar tersebut saat ini masih tersebar di berbagai wilayah dan belum disintesis secara menyeluruh untuk menghasilkan satu kesimpulan nasional yang padu. Padahal, hasil pemantauan penginderaan jauh jangka panjang justru mengonfirmasi adanya tren penyusutan tutupan karang hidup yang nyata akibat perpaduan tekanan antropogenik dan gangguan alami, seperti pemutihan karang, predasi, dan sedimentasi (Nurdin *et al.*, 2024). Adanya variasi tren degradasi yang kontras antarwilayah menegaskan bahwa dampak dari setiap faktor pembatas lingkungan tidak dapat digeneralisasi. Oleh karena itu, sintesis menyeluruh terhadap faktor spesifik pemicu kerusakan karang seperti sedimentasi tersuspensi, menjadi urgensi untuk menjembatani kesenjangan data dan mendukung strategi konservasi yang lebih tepat sasaran.

Kondisi terumbu karang sangat dipengaruhi oleh kualitas perairan, termasuk parameter fisik seperti *Total Suspended Solids* (TSS) yang berkaitan dengan tingkat kekeruhan perairan. TSS merupakan partikel organik maupun anorganik yang tersuspensi di dalam kolom air dan dapat memengaruhi penetrasi cahaya matahari ke dalam perairan (Isdianto *et al.*, 2022). Peningkatan konsentrasi TSS umumnya berkaitan dengan aktivitas antropogenik di wilayah pesisir seperti aliran sedimen dari daratan, perubahan penggunaan lahan, serta aktivitas perairan yang meningkatkan suspensi partikel (Noor *et al.*, 2024).

Tingginya konsentrasi TSS dapat berdampak langsung terhadap ekosistem terumbu karang melalui penurunan intensitas cahaya yang dibutuhkan oleh zooxanthellae untuk melakukan fotosintesis. Kondisi ini dapat menyebabkan terganggunya pertumbuhan, penurunan laju fotosintesis, hingga meningkatnya stres fisiologis pada karang (Kolibongso *et al.*, 2024). Selain itu, partikel tersuspensi yang mengendap pada permukaan karang juga dapat menghambat proses respirasi dan aktivitas makan sehingga menurunkan kesehatan karang secara keseluruhan (Maharani, 2022).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa hubungan TSS dan tutupan karang hidup tidak selalu bersifat seragam di berbagai wilayah perairan Indonesia. Di beberapa lokasi, peningkatan TSS berkorelasi dengan penurunan tutupan karang, sementara di lokasi lain perubahan tersebut dipengaruhi oleh faktor tambahan seperti kondisi oseanografi, tekanan antropogenik, dan perubahan iklim (Nurdjaman *et al.*, 2023). Studi jangka panjang juga menunjukkan bahwa dinamika tutupan karang di Indonesia bersifat kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan yang saling berinteraksi (Hadi *et al.*, 2023).

Beragamnya hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa hingga saat ini belum terdapat kesimpulan yang konsisten mengenai besarnya pengaruh TSS terhadap tutupan karang hidup di perairan Indonesia. TSS sendiri merupakan parameter lingkungan yang sangat dinamis secara spasial dan temporal serta sangat dipengaruhi oleh aktivitas manusia di wilayah daratan maupun pesisir (Bhuyan *et al.*, 2025). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan sintesis yang mampu mengintegrasikan berbagai hasil penelitian yang telah dipublikasikan untuk memperoleh gambaran hubungan yang lebih komprehensif antara TSS dan tutupan karang hidup. Pendekatan meta-analisis menjadi metode yang tepat karena dapat menggabungkan hasil penelitian sebelumnya untuk menghasilkan estimasi pengaruh yang lebih kuat dan representatif. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak TSS terhadap tutupan karang hidup di perairan Indonesia melalui pendekatan meta-analisis sebagai dasar ilmiah dalam pengelolaan dan konservasi ekosistem terumbu karang.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini menerapkan metode meta-analisis *Two-Group Comparison* dengan membandingkan kelompok terdampak dan kontrol. Meta-analisis merupakan sintesis statistik kuantitatif yang mengevaluasi dan menggabungkan hasil dari dua atau lebih eksperimen independen untuk menarik kesimpulan komprehensif mengenai besaran efek (*effect size*) dari hipotesis konseptual yang sama (Evrenoglou *et al.*, 2021). Data diperoleh melalui penelusuran sistematis pada basis data Google Scholar menggunakan kombinasi kata kunci: '*Total Suspended*

Solids', 'TSS', 'tutupan karang', 'Coral Cover', dan 'perairan Indonesia'. Untuk meminimalkan bias publikasi (*publication bias*) serta memastikan keterwakilan spasial yang komprehensif, strategi penelusuran tidak membatasi status akreditasi jurnal (seperti indeks SINTA). Hal ini menjamin data dari jurnal lokal yang belum terindeks namun memiliki metodologi sampling valid tetap tersintesis. Pemilihan artikel didasarkan pada kriteria inklusi yang ketat. Pertama, studi primer harus dilakukan di wilayah perairan Indonesia pada rentang tahun 2017–2026. Kedua, studi tersebut melaporkan parameter kuantitatif *Total Suspended Solids* (TSS) bersamaan dengan persentase tutupan karang hidup. Ketiga, studi menyediakan nilai data mentah yang dapat dikonversi menjadi rata-rata (*mean*), jumlah sampel (*n*), dan Standar Deviasi (SD). Hanya artikel yang memenuhi ketiga kriteria tersebut secara simultan yang diikutsertakan dalam proses sintesis kuantitatif.

Proses identifikasi dan seleksi literatur dijalankan secara sistematis dan transparan mengikuti pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (Page *et al.*, 2021). Merujuk pada Mengist *et al.* (2020), implementasi metode PRISMA mencakup tiga fase utama: identifikasi (*identification*), penyaringan (*screening*), dan penyertaan (*inclusion*). Seluruh artikel yang tidak memenuhi kriteria inklusi dieksklusi secara bertahap, dan alur proses seleksi ini disajikan secara struktural pada Gambar 1.

Pada fase awal identifikasi, sejumlah artikel dikeluarkan dengan alasan spesifik (*records removed for other reasons*, *n* = 21) karena berupa skripsi/tugas akhir pada repositori institusi atau disebabkan oleh kendala tautan jurnal yang rusak (*broken URLs*). Artikel yang lolos skrining awal kemudian dievaluasi mutunya secara independen berdasarkan kejelasan desain eksperimen atau observasi lapangan sebelum dilakukan ekstraksi data. Pada tahap uji kelayakan (*eligibility*), artikel dieksklusi berdasarkan tiga alasan. Pertama, artikel memiliki stasiun penelitian kurang dari empat sehingga jumlahnya tidak memadai untuk kalkulasi nilai *mean* dan SD (*n* = 15). Kedua, artikel tidak melaporkan data parameter TSS maupun tutupan karang (*n* = 35). Ketiga, artikel tidak menyajikan data spesifik TSS (*n* = 93). Setelah proses eksklusi tersebut, hanya artikel yang memenuhi seluruh kriteria kelayakan yang dilanjutkan ke tahap ekstraksi dan sintesis data.

Selain itu, artikel juga dieksklusi jika nilai TSS dan tutupan karang yang dilaporkan sudah dalam bentuk *mean* agregat atau rentang keseluruhan, bukan berupa nilai data mentah terpisah per stasiun pengamatan yang sangat dibutuhkan untuk proses klusterisasi.

Dikarenakan mayoritas artikel primer tidak melaporkan nilai rerata (*mean*) dan standar deviasi (SD) tutupan karang secara eksplisit untuk tiap gradien konsentrasi TSS, penelitian ini melakukan rekonstruksi data statistik secara mandiri (*investigator-calculated summary statistics*). Stasiun-stasiun tersebut kemudian dikelompokkan secara objektif menjadi dua klaster berdasarkan profil lingkungannya, yaitu Kelompok TSS Rendah (*Low TSS Group*) dan Kelompok TSS Tinggi (*High TSS Group*). Pendekatan kategorisasi berbasis tingkat tekanan lingkungan (*ambient vs elevated*) pada data observasi lapangan ini telah dilakukan dalam meta-analisis ekologi laut kumulatif lainnya seperti Jin *et al.* (2021) dan Stockbridge *et al.* (2020).

Instrumen yang digunakan dalam tahap ini berupa lembar ekstraksi data (*coding sheet*) untuk mengumpulkan informasi terstruktur dari setiap artikel yang memenuhi kriteria inklusi. Data yang diekstraksi meliputi ukuran sampel (*n*), nilai *mean*, dan standar deviasi (SD), yang kemudian disusun dalam lembar kerja untuk dianalisis menggunakan perangkat lunak JASP versi 0.97.1. Ukuran efek (*effect size*) dalam meta-analisis ini dihitung menggunakan metrik Hedges' *g*. Nilai Hedges' *g* diperoleh dari selisih rerata tutupan karang hidup antara kelompok TSS tinggi ($\bar{X}_1$) dan kelompok TSS rendah ($\bar{X}_2$), dibagi dengan simpangan baku gabungan (*pooled standard deviation*), serta dikoreksi menggunakan faktor koreksi sampel kecil (*J*) (Borenstein *et al.*, 2021; Hedges, 1981):

$$g = J \times \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_{pooled}}$$

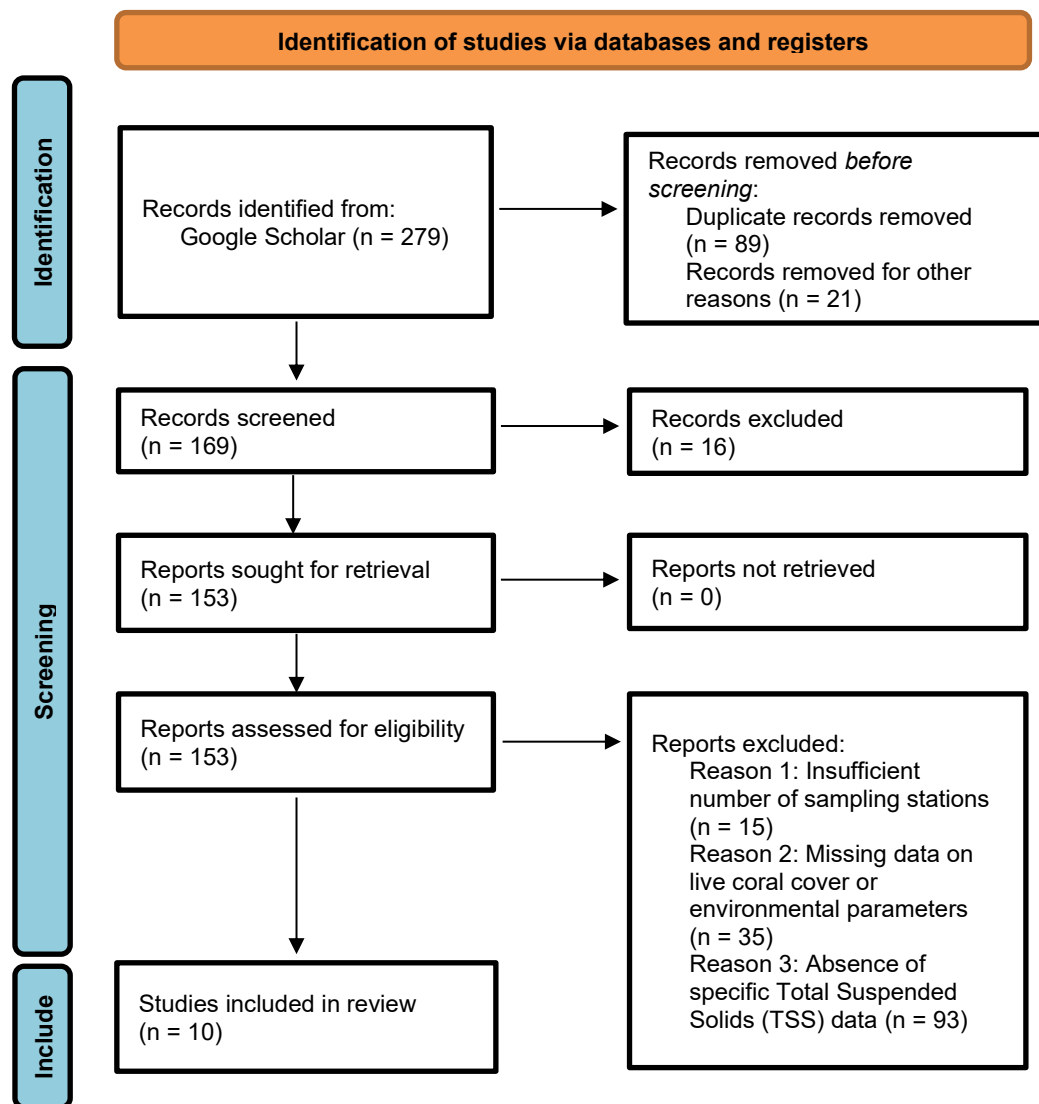
di mana faktor koreksi (*J*) dihitung melalui persamaan $J = 1 - \frac{3}{4(n_1 + n_2 - 2) - 1}$. Nilai Hedges' *g* bernilai negatif mengindikasikan bahwa tutupan karang pada kelompok TSS tinggi lebih rendah dibandingkan kelompok TSS rendah (kontrol). Seluruh kalkulasi statistik ukuran efek dan estimasi

efek gabungan dalam penelitian ini dieksekusi menggunakan perangkat lunak JASP. Selanjutnya nilai yang diperoleh dari JASP diinterpretasikan dengan mengacu pada kriteria Cohen (1988) sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Heterogenitas antarstudi diuji menggunakan statistik Cochran's Q dan indeks I^2 . Selanjutnya, analisis meta-analisis diestimasi menggunakan *Random-Effects Model* dengan metode *Restricted Maximum Likelihood* (REML). Hasil analisis keseluruhan disajikan secara visual dalam bentuk *forest plot*, sedangkan potensi bias publikasi dievaluasi menggunakan *funnel plot*.

Tabel 1. Kriteria skor ukuran efek (*effect size*) Cohen

Rentang Skor Ukuran Efek (<i>Effect Size</i>)	Kriteria
0,20 - 0,49	Kecil
0,50 - 0,79	Sedang
$\geq 0,80$	Besar



Gambar 1. Bagan PRISMA

HASIL DAN PEMBAHASAN

Meta-analisis ini berhasil mengintegrasikan temuan dari 10 studi primer independen yang melaporkan data kuantitatif persentase tutupan karang hidup (*live coral cover*) secara simultan dengan parameter lingkungan TSS. Seluruh studi yang terpilih telah memenuhi kriteria inklusi yang ketat, termasuk batasan temporal publikasi dalam rentang waktu sepuluh tahun terakhir, yaitu dari tahun 2017 hingga 2026. Karakteristik metodologi dan profil data dari masing-masing studi inklusi tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 2.

Berdasarkan data pada Tabel 2, literatur yang dievaluasi mencakup variabilitas spasial yang luas dengan lokasi pengamatan yang tersebar di berbagai wilayah perairan Indonesia. Selain variasi geografis, ditemukan pula keberagaman dalam metode pengambilan data tutupan karang di lapangan pada studi-studi primer tersebut. Metode-metode tersebut meliputi *Underwater Photo Transect* (UPT), *Line Intercept Transect* (LIT), *Belt Transect*, *Quadratic Transect*, serta pemantauan berbasis sensor visual melalui *Underwater Visual Census* (UVC). Variasi metodologi lapangan dan keanekaragaman spasial ini mencerminkan heterogenitas kondisi ekologis nyata pada perairan Indonesia, yang kemudian dikontrol dan dianalisis secara tangguh melalui pendekatan *Random-Effects Model*.

Setelah pemetaan karakteristik studi pada Tabel 2, langkah berikutnya adalah melakukan ekstraksi data statistik deskriptif dari sepuluh artikel studi primer tersebut yang mencakup nilai rata-rata (mean), standar deviasi (SD), dan ukuran sampel (n). Data tersebut kemudian dikelompokkan secara objektif ke dalam dua klaster lingkungan, yaitu Kelompok TSS Tinggi (*High TSS Group*) dan Kelompok TSS Rendah (*Low TSS Group*), untuk selanjutnya diolah menggunakan perangkat lunak JASP untuk menghitung besaran pengaruh (*effect size*) dari masing-masing studi maupun estimasi meta-analisis gabungan yang disajikan pada Tabel 3.

Sebelum menginterpretasikan besaran efek gabungan (*pooled effect size*), perlu dilakukan pengujian terhadap tingkat konsistensi atau variabilitas antarstudi yang dianalisis melalui uji heterogenitas. Evaluasi parameter statistik heterogenitas tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 4.

Berdasarkan hasil uji heterogenitas pada Tabel 4, diperoleh nilai statistik Cochran's $Q_e(9) = 5,41$ dengan derajat kebebasan (df) = 9 dan nilai signifikansi p -value sebesar 0,797 ($p > 0,05$). Uji heterogenitas dalam meta-analisis digunakan untuk mengevaluasi apakah variasi nilai efek antarstudi primer disebabkan oleh perbedaan karakteristik riil di lapangan atau sekadar faktor kebetulan (Higgins & Thompson, 2002). Berdasarkan hasil analisis menggunakan *Random-Effects Model*, diperoleh nilai heterogenitas (I^2) sebesar 0%. Hal ini menunjukkan bahwa variasi data dari seluruh studi primer yang diintegrasikan murni terjadi karena kebetulan (*sampling error*) sehingga bersifat sepenuhnya homogen. Nilai 0% ini mengindikasikan bahwa respons biologis ekosistem terumbu karang terhadap tekanan TSS bersifat universal dan seragam di berbagai wilayah perairan Indonesia. Konsistensi dampak yang mutlak ini membuktikan bahwa meskipun 10 studi primer tersebut diambil dari karakteristik spasial dan metodologi pengambilan sampel yang bervariasi, pola penurunan persentase tutupan karang hidup akibat peningkatan sedimentasi TSS tetap menunjukkan hubungan yang sama dan berlaku secara general. Selanjutnya, dilakukan evaluasi terhadap bias publikasi secara visual melalui sebaran estimasi efek studi pada grafik *funnel plot* (Gambar 2).

Evaluasi terhadap bias publikasi dilakukan secara visual melalui sebaran estimasi efek studi pada grafik *funnel plot* untuk menjamin keandalan dan validitas kesimpulan gabungan (Borenstein *et al.*, 2021). Berdasarkan grafik *funnel plot* pada Gambar 2, hasil plot menunjukkan bentuk corong yang simetris, di mana titik-titik representasi dari setiap studi primer tersebar secara seimbang di bagian tengah grafik dan berada di dalam area atau koridor berwarna putih. Distribusi titik studi yang mengelompok secara simetris di sekitar garis efek gabungan ini mengonfirmasi tidak adanya indikasi bias publikasi yang parah, seperti fenomena *file drawer effect* yang kerap menyembunyikan studi-studi berefek kecil atau tidak signifikan secara statistik (Rothstein *et al.*, 2005). Secara visual, funnel plot tidak memperlihatkan asimetri yang mencolok. Namun, karena jumlah studi terbatas dan sebagian besar studi memiliki tingkat presisi yang relatif rendah, kemungkinan bias publikasi belum

dapat disingkirkan. Selanjutnya, nilai meta-analisis gabungan beserta kontribusi dari masing-masing studi primer disajikan secara visual melalui forest plot pada Tabel 5 dan Gambar 3.

Berdasarkan analisis pada grafik *forest plot* pada Gambar 3, Hasil estimasi efek gabungan (*pooled effect size*) berdasarkan uji-t dengan koreksi Knapp-Hartung menunjukkan nilai Hedges' $g = -0,44$ dengan rentang interval kepercayaan (95% CI) sebesar $-0,83$ hingga $-0,05$ ($t(9) = -2,53$; $p = 0,032$). Tanda negatif (-) pada angka estimasi ini bukan menunjukkan ketiadaan pengaruh, melainkan mengonfirmasi arah hubungan yang berbanding terbalik yakni peningkatan konsentrasi TSS secara signifikan ($p = 0,032$) diikuti oleh penurunan persentase tutupan karang hidup di lapangan. Kekuatan dampak berada pada kategori kecil menurut ukuran efek Cohen di Tabel 1. Hal ini menunjukkan bahwa TSS bukan sebuah dampak yang ekstrem, namun mengindikasikan bahwa kerusakan karang di perairan Indonesia tidak hanya dikendalikan oleh satu faktor biofisik tunggal seperti sedimentasi TSS semata. Di ekosistem nyata, terumbu karang diduga kuat sedang menghadapi tekanan *multi-stressor*, di mana faktor gangguan manusia langsung (antropogenik) seperti aktivitas pemukiman pesisir, pariwisata tak terkendali, hingga destruksi fisik lokal, bekerja bersama-sama sehingga menggeser dominasi pengaruh linear dari parameter lingkungan alamnya.

Tabel 2. Karakteristik Studi

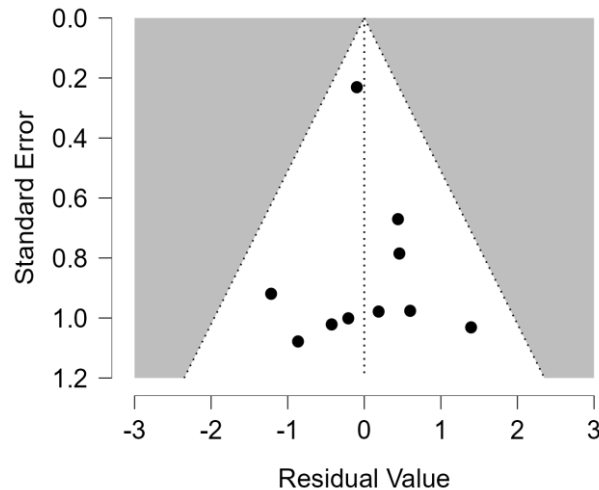
Kode	Penulis Studi	Lokasi	Metode
A1	Alqodri <i>et al.</i> (2023)	Bangka Tengah	UPT
A2	Nirwanda <i>et al.</i> (2017)	Kabupaten Bangka	<i>Belt Transect</i>
A3	Nugroho <i>et al.</i> (2024)	Karimunjawa	UPT
A4	Barus <i>et al.</i> (2018)	Teluk Lampung	<i>Quadratic Transect</i>
A5	Wahab <i>et al.</i> (2021)	Pulau Morotai	LIT
A6	Parenden <i>et al.</i> (2023)	Kepulauan Spermonde	UPT
A7	Sipahutar & Rifardi (2023)	Pulau Setan	UPT
A8	Riska <i>et al.</i> (2019)	Konawe Selatan	LIT
A9	Risqia <i>et al.</i> (2021)	Kabupaten Bangka	LIT
A10	Weliyadi <i>et al.</i> (2025)	Kalimantan Utara	UPT dan UVC

Tabel 3. Data Statistik Deskriptif (Nilai Mean, SD, N)

Code	HighTSS_Mean	LowTSS_Mean	HighTSS_SD	LowTSS_SD	HighTSS_n	LowTSS_n
A1	30,90	69,84	23,801	22,478	2	2
A2	29,98	37,58	23,936	1,294	2	2
A3	43,06	43,06	8,442	2,719	4	4
A4	21,44	47,43	12,369	12,660	3	3
A5	51,54	8,85	35,072	6,576	2	2
A6	4,27	11,33	6,600	16,960	20	20
A7	11,08	26,67	13,039	6,025	2	2
A8	24,11	30,68	4,165	6,930	2	2
A9	62,18	57,05	15,952	20,202	2	2
A10	41,62	41,07	22,478	25,879	3	3

Tabel 4. Heterogenitas Distribusi Ukuran Efek

Qe	df	p-value	Tau ²	I ²
5,41	9	0,797	0,00	0,00



Gambar 2. *Funnel Plot*

Berdasarkan grafik *forest plot* pada Gambar 2, setiap studi primer menunjukkan nilai ukuran efek (*effect size*) individu yang bervariasi luas, yaitu berkisar antara -1,66 hingga 0,95. Rentang ini mengindikasikan adanya variasi dampak, mulai dari pengaruh negatif berskala besar terhadap penurunan tutupan karang hidup (*live coral cover*), hingga studi yang justru menunjukkan tren peningkatan tutupan karang. Meskipun demikian, nilai estimasi efek gabungan (*pooled effect size*) menghasilkan angka agregat sebesar -0,44. Hal ini menegaskan bahwa secara umum, TSS memiliki kekuatan dampak pada kategori kecil mendekati sedang dalam menekan persentase tutupan karang hidup.

Temuan homogenitas dalam hasil meta-analisis ini sejalan dengan mekanisme biologis yang telah banyak diulas dalam literatur. Peningkatan TSS menyebabkan kekeruhan perairan meningkat sehingga penetrasi cahaya ke kolom air berkurang. Pada akhirnya, proses atenuasi (penyerapan) cahaya tersebut menurunkan efisiensi fotosintesis alga simbiotik (*zooxanthellae*), sehingga membatasi sumber energi utama yang dibutuhkan oleh karang untuk bertahan hidup (Tuttle & Donahue, 2022). Selain itu, karang harus mengalokasikan energi tambahan untuk membersihkan partikel sedimen yang menumpuk di permukaan jaringannya. Kondisi tertekan akibat sedimentasi ini memicu peningkatan laju respirasi pada malam hari serta penurunan efisiensi fotosintesis *pada* siang hari, yang pada akhirnya menyebabkan penurunan cadangan energi karang secara signifikan dibandingkan kondisi normal (Sheridan *et al.*, 2014). Hal ini juga diperkuat oleh hasil eksperimen laboratorium Flores *et al.* (2012) yang menunjukkan bahwa paparan sedimen secara kronis dapat menyebabkan kerusakan jaringan secara progresif hingga kematian koloni secara total. Kematian karang tersebut umumnya teramati setelah lebih dari empat minggu paparan, yang berkaitan erat dengan akumulasi dan durasi penutupan sedimen pada permukaan jaringan karang.

Kekuatan dampak gabungan TSS yang berada pada kategori kecil ini merefleksikan variabilitas kontribusi data primer di lapangan. Sebagai gambaran kontekstual di tingkat studi individual, variasi TSS memang terbukti memegang peranan penting terhadap kondisi karang, seperti ditunjukkan oleh Andaris *et al.* (2015) melalui nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0,3871$) dan korelasi ($r = 0,62$). Bahkan, pada wilayah dengan tingkat sedimentasi akut seperti di Pemuteran, Bali, Al-Alif *et al.* (2017) menemukan hubungan linier negatif yang jauh lebih kuat ($r = -0,724$) antara parameter TSS (248–504 mg/L) dengan tutupan terumbu karang. Pola hubungan ini sejalan dengan analisis multivariat di pesisir Banda Aceh, di mana fluktuasi TSS berkorelasi positif kuat dengan kekeruhan (*turbidity*) dan klorofil-a yang secara langsung menurunkan kejernihan air pesisir (Wisha *et al.*, 2026).

Temuan efek gabungan tidak berada dalam kategori ekstrem ini mengindikasikan bahwa dampak TSS tidak selalu bersifat linear, melainkan bergantung pada respons fisiologis karang yang

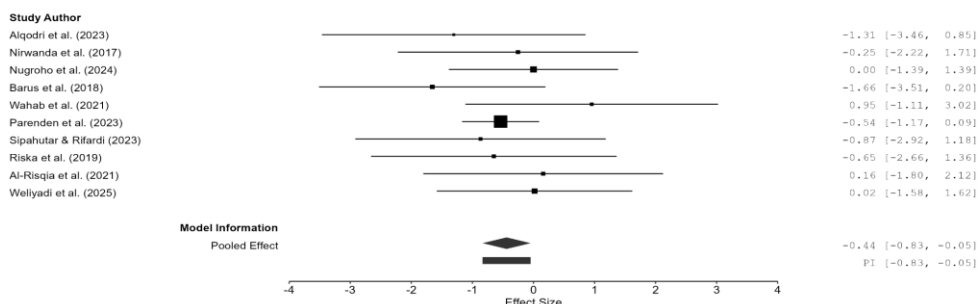
tidak seragam (*uniform*). Variasi ini ditentukan oleh faktor taksonomi, morfologi intraspesifik, serta kemampuan biologis tiap taksa dalam melakukan pembersihan diri melalui gerakan silia dan produksi mukus (Erftemeijer *et al.*, 2012). Selain faktor biologis, studi Wahab *et al.* (2021) di perairan Daruba memperkuat kondisi ini dengan menunjukkan bahwa TSS secara parsial tidak memiliki korelasi signifikan ($p > 0,05$) terhadap tutupan karang, karena dinamika air seperti arus dan oksigen terlarut (DO) justru lebih dominan memengaruhi kelompok genus tertentu seperti *Acropora*. Kondisi hidro-oseanografi lokal ini serupa dengan pemodelan di Banda Aceh, di mana kecepatan arus dan siklus pasang surut (*spring-neap tides*) mengontrol retensi serta pembersihan sedimen secara periodik (Wisha *et al.*, 2026). Fluktuasi lingkungan yang dinamis ini memberikan jeda waktu krusial bagi polip karang untuk pulih, sekaligus menjelaskan mengapa parameter TSS dan turbiditas memiliki pola sebaran geografis yang spesifik dan tidak dapat dipertukarkan secara mutlak di setiap wilayah (Whitall & Bricker, 2021).

Lebih lanjut, tingginya persentase komponen abiotik berupa pasir, lumpur (*silt*), dan patahan karang (*rubble*) yang mencapai 30,3–71,06% pada area dengan tutupan karang rendah (Wahab *et al.*, 2021) mempertegas bahwa degradasi ekosistem di lapangan merupakan akumulasi kompleks dari tekanan *multi-stressor*. Tingkat penurunan tutupan karang hidup di perairan Indonesia tidak lagi digerakkan oleh parameter lingkungan tunggal, melainkan hasil interaksi antara agen fisik TSS dengan suplai sedimen antropogenik dari darat serta destruksi mekanis di tingkat lokal. Karena TSS yang berinteraksi dengan berbagai tekanan lingkungan lain dapat memperburuk degradasi jaringan karang secara berkelanjutan, upaya konservasi terumbu karang yang efektif tidak dapat disamaratakan.

Meskipun memberikan estimasi yang cukup kohesif, penelitian meta-analisis ini memiliki keterbatasan karena ruang lingkup pencarian data yang dibatasi pada literatur sepuluh tahun terakhir di wilayah perairan Indonesia. Selain itu, walaupun uji heterogenitas menunjukkan nilai $I^2 = 0\%$, nilai efek gabungan yang diperoleh tidak dapat diinterpretasikan sebagai akibat dari parameter lingkungan tunggal (TSS) saja, melainkan merupakan representasi dari interaksi *multi-stressor* yang secara akumulatif memperburuk kondisi tutupan karang. Oleh karena itu, penelitian meta-analisis lanjutan sangat disarankan untuk mengintegrasikan variabel moderator lain dari parameter kualitas air seperti turbiditas, oksigen terlarut (DO), dan kecepatan arus. Hal ini bertujuan untuk memetakan besar pengaruh lingkungan secara lebih komprehensif. Sebagai implikasi praktis untuk langkah konservasi, diperlukan pengkajian, observasi, dan analisis kualitas perairan berbasis spesifik lokasi (*site-specific assessment*) guna menangkap karakteristik unik dan memberikan perlindungan yang tepat bagi setiap ekosistem terumbu karang yang terancam di Indonesia.

Tabel 5. Hasil Meta-Analisis Keseluruhan

Model	n	Ukuran Efek (Effect Size)	SE	p-value	Batas Atas CI 95%	Batas Bawah CI 95%
<i>Random-Effects</i> (Restricted ML)	10	-0,4401	0,1741	0,032	-0,8338	-0,04632



Gambar 3. Forest Plot

KESIMPULAN

Penelitian meta-analisis terhadap 10 studi primer berhasil membuktikan bahwa peningkatan *Total Suspended Solids* (TSS) secara nyata berdampak negatif terhadap penurunan persentase tutupan karang hidup di perairan Indonesia (nilai efek gabungan (*effect size*) = -0,44; $p = 0,032$). Hasil uji heterogenitas ($I^2 = 0\%$) dan *funnel plot* yang simetris mengonfirmasi bahwa dampak merusak dari TSS ini bersifat konsisten dan seragam di berbagai wilayah perairan Indonesia, bebas dari indikasi bias publikasi yang parah. Besarnya efek yang relatif kecil mungkin berkaitan dengan peran faktor lingkungan dan antropogenik lain. Penjelasan tersebut masih bersifat hipotesis karena variabel moderator belum dianalisis dalam meta-analisis ini. Secara keseluruhan, temuan ini menyajikan kesimpulan yang benar dan berbasis bukti ilmiah kuat untuk menunjang upaya pengelolaan kualitas perairan serta konservasi terumbu karang di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Alif, S.A., Karang, I.W.G.A., & Suteja, Y., 2017. Analisis hubungan kondisi perairan dengan terumbu karang di Desa Pemuteran Buleleng Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 3(2):142–153. DOI: 10.24843/jmas.2017.v3.i02.142-153
- Alqodri, M.F., Supratman, O., & Muftiadi, M.R., 2023. Asosiasi bulu babi (*Diadema setosum*) pada ekosistem terumbu karang di perairan Pulau Panjang Bangka Tengah. *Aquatic Science: Jurnal Ilmu Perairan*, 5(2):65–71. DOI: 10.33019/aquaticscience.v5i2.46
- Andaris, A.R., Suryanto, A., & Muskananfolo, M.R., 2015. Hubungan faktor fisik—kimia perairan terhadap tutupan terumbu karang di Pulau Karimunjawa. *Management of Aquatic Resources Journal*, 4(3):29–36. DOI: 10.14710/marj. v4i3.9206
- Barus, B.S., Prartono, T., & Soedarma, D., 2018. Pengaruh lingkungan terhadap bentuk pertumbuhan terumbu karang di perairan Teluk Lampung. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 10(3):699–709. DOI: 10.29244/jitkt.v10i3.21516
- Bhuyan, M.S., Jenzri, M., & Adikari, D., 2025. Impacts of sedimentation on coral health and reef ecosystems: A comprehensive review. *Marine Pollution Bulletin*, 221:118480. DOI: 10.1016/j.marpolbul. 2025.118480
- Borenstein, M., Hedges, L.V., Higgins, J.P., & Rothstein, H.R., 2021. Introduction to meta-analysis (Edisi ke-2). Chichester: John Wiley & Sons.
- Cohen, J., 1988. Statistical power analysis for the behavioral sciences (Edisi ke-2). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Erftemeijer, P.L.A., Riegl, B., Hoeksema, B.W., & Todd, P.A., 2012. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 64(9):1737–1765. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.05.008
- Evrenoglou, T., Metelli, S., & Chaimani, A., 2021. Introduction to meta-analysis. Dalam: *Principles and Practice of Clinical Trials*. Cham: Springer, 1–11. DOI: 10.1007/978-3-319-52677-5_287-1
- Flores, F., Hoogenboom, M.O., Smith, L.D., Cooper, T.F., Abrego, D., & Negri, A.P., 2012. Chronic exposure of corals to fine sediments: Lethal and sub-lethal impacts. *PLoS ONE*, 7(5):e37795. DOI: 10.1371/journal.pone.0037795
- Hadi, T.A., Utama, R.S., & Arfianti, T., 2023. Species richness and the dynamics of coral cover in Bangka Belitung Islands, Indonesia. *PeerJ*, 11:e14625. DOI: 10.7717/peerj.14625
- Hedges, L.V., 1981. Distribution theory for Glass's estimator of effect size and related estimators. *Journal of Educational Statistics*, 6(2):107–128. DOI: 10.2307/1164588
- Higgins, J.P., & Thompson, S.G., 2002. Quantifying heterogeneity in a meta-analysis. *Statistics in Medicine*, 21(11):1539–1558. DOI: 10.1002/sim.11 86
- Isdianto, A., Syarief, S.N.P., Gibran, K., Putra, M.N.E., Pattisahusiwa, A.S.P., Ishaq, S.Y., Saputra, T.E., Nizery, S.P.R., Asadi, M.A., Setyanto, A., Putri, B.M., Fathah, A.L., Wardana, N.K., Supriyadi, S., & Luthfi, O.M., 2022. Hubungan parameter hidro-oseanografi dengan tutupan karang di perairan Selat Sempu. *Journal of Fisheries and Marine Research*, 6(3):45–53. DOI:

- 10.21776/ub.jfmr.2022.006.03.7
- Jin, P., Zhang, J., Wan, J., Overmans, S., Gao, G., Ye, M., Dai, X., Zhao, J., Xiao, M., & Xia, J., 2021. The combined effects of ocean acidification and heavy metals on marine organisms: A meta-analysis. *Frontiers in Marine Science*, 8:801889. DOI: 10.3389/fmars.2021.801889
- Kolibongso, D., Alfani, H.G., Loinenak, F.A., Sembel, L., & Purba, G.Y.S., 2024. Pengaruh sedimentasi terhadap tutupan terumbu karang di perairan Arfai, Manokwari, Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, 27(2):225–235. DOI: 10.14710/jkt.v27i2.22130
- Maharani, M., 2022. Percentage of coverage and coral reef mortality index in Pomalaa waters, Southeast Sulawesi. *Jurnal Sumberdaya Akuatik Indopasifik*, 6(3):231–242. DOI: 10.46252/jsai-fpik-unipa.2022.Vol.6.No.3.241
- Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G., 2020. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*, 7:100777. DOI: 10.1016/j.mex.2019.100777
- Nirwanda, S., Adi, W., & Syari, I.A., 2017. Inventarisasi penyakit karang di perairan Turun Aban Kabupaten Bangka. *Akuatika Indonesia*, 11(1):18–25. DOI: 10.24198/jaki.v11i1.23348
- Noor, R.J., Isman, M., Lapong, M.I., & Fathuddin, F., 2024. Analysis of the rate and nutrient content of sediment in the coral transplantation installation vertical method on Samalona Island, Makassar City. *Jurnal Sumberdaya Akuatik Indopasifik*, 8(1):11–22. DOI: 10.46252/jsai-fpik-unipa.2024.Vol.8.No.1.382
- Nugroho, D., Afiati, N., Purnomo, P.W., Ayuningrum, D., & Jati, O.E., 2024. Tingkat sensitivitas ekosistem terumbu karang oleh buangan limbah tambak udang (*Litopenaeus vannamei*) di pesisir Pantai Legon Boyo, Karimunjawa. *Jurnal Pasir Laut*, 8(2):114–122. DOI: 10.14710/jpl.8.2.114-122
- Nurdin, N., Prasyad, H., Rani, C., Al Azizi, S.Q., Pulubuhu, D.A.T., Aris, A., Aushaf, S.T., & Komatsu, T., 2024. Tracking coral loss in the Spermonde Archipelago of Indonesia: 32 years of satellite monitoring from 1990 to 2022. *International Journal of Remote Sensing*, 45(23):8937–8967. DOI: 10.1080/01431161.2023.2268823
- Nurdjaman, S., Nasution, M., Johan, O., Napitupulu, G., & Saleh, E., 2023. Impact of climate change on coral reefs degradation at West Lombok, Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, 26(3):451–463. DOI: 10.14710/jkt.v26i3.18540
- Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., & Brennan, S.E., 2021. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10:89. DOI: 10.1186/s13643-021-01626-4
- Parenden, D., Jompa, J., Rani, C., Renema, W., & Tuhumena, J.R., 2023. Biodiversity of hard coral (*Scleractinia*) and relation to environmental factors turbid waters in Spermonde Islands, South Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 24(9):4635–4643. DOI: 10.13057/biodiv/d240903
- Razak, T.B., Budaya, R.R., Hukom, F.D., Subhan, B., Assakina, F.K., Fauziah, S., Jasmin, H.H., Vida, R.T., Alisa, C.A.G., Ardiwijaya, R., White, A.T., & Tebbett, S.B. 2024. Long-term dynamics of hard coral cover across Indonesia. *Coral Reefs*, 43: 1563–1580. DOI: 10.1007/s00338-024-02540-6
- Riska, Tasak, A.R., Lalang, Kamur, S., Wahab, I., & Maharani, 2019. Identifikasi penyakit dan gangguan kesehatan terumbu karang di perairan Desa Langgapulu Konawe Selatan Sulawesi Tenggara. *Jurnal Laut dan Pulau Khatulistiwa*, 1(2):98–106. DOI: 10.35308/jlik.v1i2.1524
- Risqia, S., Kurniawan, A., & Ambalika, I., 2021. Kepadatan bulu babi (*Diadema setosum*) pada ekosistem terumbu karang di Karang Kering perairan Bedukang Kabupaten Bangka. *Journal of Tropical Marine Science*, 4(2):84–93. DOI: 10.33019/jour.trop.mar.sci.v4i2.2204
- Rothstein, H.R., Sutton, A.J., & Borenstein, M. (Eds.), 2005. Publication bias in meta-analysis: Prevention, assessment and adjustments. Chichester: John Wiley & Sons.
- Sheridan, C., Grosjean, P., Leblud, J., Palmer, C.V., Kushmaro, A., & Eeckhaut, I., 2014. Sedimentation rapidly induces an immune response and depletes energy stores in a hard coral. *Coral Reefs*, 33:1067–1076. DOI: 10.1007/s00338-014-1202-x

-
- Sipahutar, A.N., & Rifardi, 2023. Effect of sediment accumulation rate on coral cover in the waters of Setan Island, West Sumatra, Indonesia. *AACL Bioflux*, 16(4):2264–2275.
- Stockbridge, J., Jones, A.R., & Gillanders, B.M., 2020. A meta-analysis of multiple stressors on seagrasses in the context of marine spatial cumulative impacts assessment. *Scientific Reports*, 10: 119 34. DOI: 10.1038/s41598-020-68 801-w
- Tuttle, L.J., & Donahue, M.J., 2022. Effects of sediment exposure on corals: A systematic review of experimental studies. *Environmental Evidence*, 11:4. DOI: 10.1186/s13750-022-00256-0
- Wahab, I., Koroy, K., & Lukman, M., 2021. Pengaruh parameter fisikimia terhadap tutupan karang di perairan Daruba, Morotai. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, 27(2):67–77. DOI: 10.15578/jppi.27.2.2021.67-77
- Weliyadi, E., Anggoro, S., Haeruddin, Saputra, S.W., Najib, M., Amaliah, F., Kase, A.A.B., Yusuf, M.Y., & Akhmadi, M.F., 2025. Baseline assessment of coral and fish assemblage relationships in Tanjung Palas Timur Marine Protected Area, North Kalimantan, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 26(10):5303–5313. DOI: 10.13057/biodiv/d261043
- Whitall, D., & Bricker, S., 2021. Examining ambient turbidity and total suspended solids data in South Florida towards development of coral specific water quality criteria. NOAA Technical Memorandum NOS NCCOS 297. Silver Spring: NOAA.
- Wisha, U.J., Afgatiani, P.M., Purwanto, A.D., Ondara, K., Wijaya, Y.J., Maslukah, L., Tarigan, T.A., Lubis, M.Z., & Ismanto, A., 2026. Spatiotemporal variability of total suspended sediment (TSS) in the Banda Aceh coastal zone, Indonesia, and its environmental implications. *Anthropocene Coasts*, 9:25. DOI: 10.1007/s44218-025-00121-w